

FACTIBILIDAD TÉCNICA Y AMBIENTAL DEL USO DEL ACEITE DE PALMA Y SU DERIVADO (BIODIESEL) COMO COMBUSTIBLES EN LOS MOTORES DIESEL

NÉSTOR GUTIÉRREZ *
CRISTHIAN RUIZ**

Resumen:

En este artículo se consignan las ideas fundamentales decantadas acerca del uso de mezclas entre Aceite de Palma y Biodiesel con combustible convencional en los motores Diesel de inyección directa, determinando la aplicabilidad de éstas en términos de desempeño del motor y su comportamiento en cuanto a emisiones de material particulado, específicamente material hasta 10 micras de diámetro (PM₁₀). Los resultados registrados, son producto de la fase experimental llevada a cabo por los autores en el 2005 como parte del desarrollo de sus tesis de maestría y pregrado de Ingeniería Mecánica en la Universidad de los Andes, habiéndose determinado, Torque, Potencia, Consumo de Combustible y Emisiones de PM₁₀; su posterior interpretación y análisis de resultados, permite concluir la viabilidad técnica del uso de las mezclas, así como el planteamiento de un procedimiento para la evaluación de condiciones de trabajo de las mismas y correspondientes adecuaciones del motor. Finalmente, se realiza una aproximación hacia la factibilidad técnica, medio ambiental y financiera del proceso de producción y utilización de Biodiesel de aceite de palma.

Palabras clave: Combustibles Vegetales, Biodiesel, Material Particulado, Motores Diesel, Procesos de Combustión.

INTRODUCCIÓN

La vigencia del motor Diesel, como integrante fundamental de algunos sistemas de transformación de energía. Se funda en sus relativas bondades en términos de eficiencia, durabilidad y bajos costos de operación y mantenimiento. No obstante dadas las propiedades de los combustibles fósiles distribuidos en el país, específicamente el alto contenido de azufre en el ACPM ha ocasionado un incremento en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y Material Particulado (PM) a la atmósfera. En cuanto al PM, sus emisiones se constituyen principalmente por partículas de carbón no quemado, sulfatos, nitratos, amonio, cloro, y partículas de metales como hierro, mercurio y plomo que al ser emitidas permanecen suspendidas en el aire. Dependiendo del tamaño, su clasificación es: PM₁₀, partículas con diámetro por debajo de 10 micras, y PM_{2,5}, partículas con diámetros inferiores a 2.5 micras.

Recientes estudios han demostrado que las emisiones de PM₁₀ tienen efectos negativos sobre la salud humana, porque pueden entrar con facilidad en las vías respiratorias y alterar la actividad alveolar. Ciertamente el tamaño y solubilidad de estas partículas favorecen su absorción a través del sistema respiratorio, por lo que se les atribuye la causa de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), (Rojas, N., 2004).

Se busca por lo tanto alternativas energéticas que permitan contrarrestar estos impactos negativos, siendo la comunidad científica la que muestra interés en el desarrollo de estudios tendientes a impulsar e implementar sistemas de suministro de energía a partir de la producción y aprovechamiento de la biomasa. En Colombia esta alternativa energética está acorde con las posibilidades agroindustriales del país y con las políticas estatales que en este campo se vienen plasmando a partir de la puesta en marcha del programa nacional de

* Ingeniero Mecánico de la Universidad Druzhby Narodov, Moscú 1981; Magíster en Ciencias Técnicas, Especialización en Diseño y Construcción de Motores de Combustión Interna de la Universidad Druzhby Narodov, Moscú 1983; Especialización en Termotecnia, Refrigeración, Aire Acondicionado y Energías Renovables, Intercampus A/L 96, Universidad de Valladolid España 1996; Especialización en Ecología, Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Incca de Colombia 2002. Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes, Bogotá 2005.

** Profesional de la Dirección de Investigaciones de la Universidad de los Andes. Ingeniero Mecánico de la Universidad de Los Andes, Bogotá 2005. Ingeniero Ambiental de la Universidad de Los Andes, Bogotá 2006.

alcohol carburante y de la expedición de la Ley 939 del 2004 que persigue el fomento de la producción y comercialización de biocombustibles para motores Diesel. De igual manera se ha constituido la Mesa Nacional de Biodiesel, iniciativa impulsada por el Ministerio del Medio Ambiente, donde se adelanta un proyecto que busca establecer la Norma técnica con parámetros únicos para Biodiesel producido en el país.

En el ámbito internacional, los estudios muestran como el uso de biocombustibles en motores Diesel dan lugar a balances energéticos normalmente positivos, dependiendo de la manera en que estos productos son empleados y procesados. Peterson (Peterson C.L, 1991) y Gumpon (Gumpon Prateepchaikul, 2003) entre otros, han indagado por la factibilidad técnica, económica, medioambiental y financiera de la utilización de aceites vegetales como combustibles en los motores Diesel, conceptualizando positivamente su desempeño.

Sin embargo, también se han reportado dificultades, específicamente en el uso de mezclas con bioaceites como consecuencia de su alta viscosidad, particularidades en su composición, tendencia a formar depósitos de carbón y otros relacionados con pruebas de larga duración. En el caso específico del aceite de palma, dado su elevado índice de viscosidad, la situación se hace crítica cuando se le quiere utilizar en los motores Diesel. La primera de las acciones encaminadas a solucionar tales inconvenientes, sugiere modificaciones importantes tanto en la construcción básica del motor como en sus sistemas auxiliares; la segunda, agrupa cambios esenciales en los aceites, a través de procesos físicos y químicos, para lograr en sus propiedades la equivalencia deseada con los combustibles de origen mineral.

Modificaciones importantes tanto en la estructura como en la organización del proceso en los motores, se fundan principalmente en:

- La necesidad de lograr y mantener temperaturas de combustión más elevadas con el propósito de atenuar el efecto de la alta viscosidad del aceite en cuanto a sus limitaciones para producir una combustión completa.
- La organización estratificada del proceso de combustión, ya por inyección discriminada a regiones de la cámara de combustión o utilizando precámaras donde se inicie y efectúe parte de la combustión con mezclas relativamente ricas, con lo que se lograría atenuar la formación de óxidos de nitrógeno.
- Modificaciones en el sistema de bombeo de alta presión del combustible, complementadas con su precalentamiento para reducir la viscosidad y facilitar la inyección del aceite.

El proceso de transformación de los aceites por excelencia es el de transesterificación, en el cual se emplea alcohol (metanol o etanol) con el fin de obtener cadenas de esteres grasos. El mayor atractivo que presenta este proceso, es que

una vez obtenido el éster (Biodiesel), ya sea de origen etílico o metílico, sus propiedades se acercan a las de los combustibles convencionales (Tabla 1). Adicional a esto, cabe anotar que las cadenas de ésteres retienen moléculas de oxígeno en su constitución (Zhou, Michelsen, 2005), lo que le otorga a este tipo de combustible mejores propiedades en la combustión. De otra parte, su contenido de azufre no es significativo y el de aromáticos es casi nulo (Kalam, Masjuki, 2002), lo que le confiere un menor potencial contaminante en comparación con el ACPM, en cuanto a la emisión de PM y NOx.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS DEL BIODIESEL Y
DEL ACEITE DE PALMA

	Diesel Típico	Biodiesel Típico	Aceite de Palma
Poder calorífico (MJ/kg)	44	40	39.3
Viscosidad Cinemática (cSt) 40°C	3	4 – 6	41
Densidad (kg/m ³)	852	874	906
Gravedad Específica (kg/l)	0.85	0.88	0.92
Calor Específico (kJ/kg.K)	1.7	2.47	2.43
Conductividad (W / m.K)	0.11	0.17	0.15
Tensión Superficial (mN/m ²)	23	25	28
Número de cetano	40-55	48-65	50
Contenido de Azufre (%)	0.05	0.001	0.001
Boiling point (°C)	180-340	315-350	>300
Flash point (°C)	60-80	100-170	>300
Cloud point (°C)	<5	<12	--
Oxígeno %	0	10.9	--
Carbón residual %	0.15	0.05	0.22

Tomada y adaptada de de Zhou (Zhou P L, 2000) y Gumpon (Gumpon Prateepchaikul, 2003).

EXPERIMENTACIÓN

Ante la necesidad de estudios que permitan juzgar la factibilidad técnica, ambiental y financiera del uso de estos combustibles alternativos, se evidencia la existencia de aspectos técnicos relacionados con el empleo de mezclas de biocombustibles en los motores diesel, que requieren análisis de fondo. Por esto se ha examinado el desempeño de un pequeño motor Diesel, a partir de su respuesta, en cuanto a sus características de velocidad y emisiones de material particulado trabajando con las siguientes mezclas:

- Mezcla B20, 20% Biodiesel y 80% ACPM
- Mezcla B40, 40% Biodiesel y 60% ACPM
- Mezcla 80, 80% Aceite de palma y 20% ACPM
- Mezcla 50, Aceite de palma y ACPM al 50%.

En la figura 1 se presentan los parámetros contemplados en las pruebas, las variables definidas y los cálculos realizados que posteriormente fueron comparados entre sí, logrando

determinar la mezcla con la cual se obtiene un mejor desempeño en el motor.

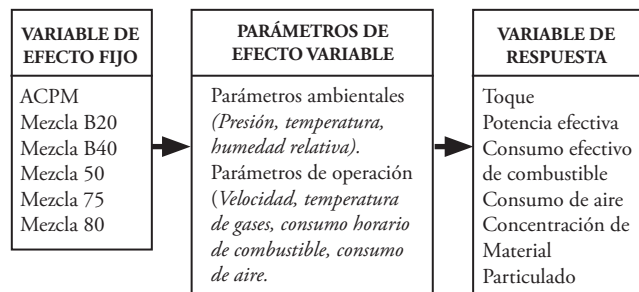


Fig. 1. Procedimiento y parámetros para las pruebas del motor en banco.

Esta etapa se realizó en un Motor Diesel de referencia HATZ 1B30, monocilíndrico, de cuatro tiempos, inyección directa y refrigerado por aire, con una relación de compresión de 1:22, cilindrada de 0.47 litros y potencia máxima de 5.5KW a 3600 RPM. Como sistema de carga se acondicionó un freno hidráulico, a partir del cual se midieron normalizadamente valores de Torque, Velocidad, Consumos de aire y combustible, los cuales gracias al sistema de adquisición de datos, fueron sensados, digitalizados y almacenados a razón de 400 datos por segundo.

Las pruebas se ajustaron a la Norma Técnica Colombiana NTC 1930. En este sentido y gracias a las bondades del sistema electrónico de adquisición de datos, los valores obtenidos fueron organizados de tal manera que se logró determinar los valores medios de Torque y Potencia para cada velocidad registrada.

RESULTADOS

Características técnicas del funcionamiento del motor

En términos del desempeño del motor, de acuerdo con los valores registrados en la tabla III, se aprecia como para los mayores porcentajes de aceite de palma y biodiesel, los valores máximos de torque y potencia disminuyen, mientras que se incrementan los de consumo específico de combustible; Igualmente se muestra como estos valores máximos se alcanzan a menores velocidades. Ahora bien, con respecto al proceso de combustión, se detectó una amplia gama de factores químicos y físicos que influyen significativamente en él y que se expresan en los resultados obtenidos. Propiedades físicas del aceite de palma y del Biodiesel como su mayor densidad, viscosidad, tensión superficial (tabla II), dificultan la optimización de su inyección, dilatando en últimas la inflamación de la mezcla y afectando por lo tanto el posterior desarrollo del proceso de combustión.

TABLA II
CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS PROBADAS.
LABORATORIO DE QUÍMICA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Propiedad	ACPM	B20	B40	50	75	80	Aceite
Viscosidad							
Cinemática (cPs) 40°C	1.69	2.01	2.22	6.85	15.64	28.71	41.00
Viscosidad							
Cinemática (cPs) 60°C	1.16	1.32	1.39	3.88	6.53	7.88	11.00
Densidad () 40°C	827	837	838	863	880	884	910
Densidad () 60°C	819	829	827	853	867	876	890
Punto de inflamación (°C)	68	--	--	74	28	108	>300
Punto de nube (°C)	--	66	74	26	28	29	40

En el desarrollo de la combustión de las mezclas de aceite de palma, en la cámara de combustión se generan zonas muy ricas en combustible, propias para la formación de material particulado.

TABLA III
REGISTRO DE VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS OBTENIDOS

	Torque Máx		Potencia Máx.		Consumo Combustible Min	
	N.m	RPM	W	RPM	g/KWh	RPM
ACPM	16.5	2200	4467	3290	267	2350
Mezcla B20	15.4	2050	4120	3150	269	2296
Mezcla B40	15.1	2012	4050	3100	271	2243
Mezcla 50	14.8	2045	4187	3224	272	2294

En contraposición con lo anterior, otras propiedades del aceite de palma y su derivado (Biodiesel) como la mayor compresibilidad isotérmica o modulo volumétrico a menores temperaturas, genera mayor rata de crecimiento de la presión durante la compresión de la mezcla a inyectar, hecho que disminuye el tiempo de inyección y la adelanta, de forma equivalente a como lo hace el sistema de avance de la inyección. Esto junto con el mayor Número de Cetano de estos biocombustibles (ver tabla 1), o una mejor pulverización y penetración del combustible, contribuyen a una mas fácil inflamación, disminuyendo el retraso de la inflamación y por lo tanto la cantidad de combustible que inicialmente se inflama. Con estas características, se obtiene un funcionamiento suave del motor, situación aceptable, pero que en caso de extremarse podría degenerar en procesos de baja intensidad, usualmente traducidos en bajas y muy tardías presiones, como resultado la consecuente pérdida de potencia, mayores consumos y mayor emisión de partículas debidos a combustión incompleta.

De otra parte, la frecuencia de rotación constituye el parámetro de mayor variación e incidencia en la combustión. El control del proceso de combustión, ajustado a las variaciones velocidad del motor se hace indispensable para su

funcionamiento. En efecto al aumentar la velocidad del motor el proceso de inflamación se dilata en el tiempo, acumulando combustible a ser inflamado, no obstante a diferencia del caso de inflamación atrasada, la rigidez no es alta, tampoco los valores de presión alcanzados, puesto que el mismo proceso difusivo de combustión al llevarse a cabo a mayores volúmenes, también se retrasa y se debilita, ocasionando nuevamente combustión incompleta, lo que se manifiesta en pérdida de potencia y aumento de emisión de partículas (PM₁₀) en el caso del aceite (tabla IV).

TABLA IV

VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM₁₀ EN LAS MEZCLAS CON RESPECTO A DIESEL CORRIENTE

Mezcla evaluada	Concentración (gr/m ³)	Variación Porcentual
Mezcla B20	0,0513	-11,6%
Mezcla B40	0,0508	-12,4%
Mezcla 50	0,0680	17,2%
Mezcla 80	0,0720	24,1%
ACPM	0,0580	0,0%

Para el Biodiesel, la situación entorno a las emisiones de PM10 es bien diferente; con este biocombustible se evidencia una disminución a medida que se incrementa el contenido de Biodiesel en la mezcla; presentándose en la mezcla B20 una disminución del 10% con respecto al ACPM y el B40 del 12%. (Tabla 4.). En este sentido, se recalca la ventaja que presenta este derivado del aceite de palma en cuanto al contenido de oxígeno en sus moléculas, dado que se mejora el proceso de combustión mitigando la tendencia de éste a la generación de carbonilla.

Finalmente y de acuerdo con lo expuesto en este acápite, se argumenta la importancia del regulador en el proceso de combustión del motor, a causa de que es éste el encargado de adelantar el avance de la inyección a medida que aumenta la frecuencia de rotación, en procura de mantener el proceso oportuno y por lo tanto óptimo. La característica del regulador o ley de avance de la inyección en función de la frecuencia de rotación, ha sido diseñada de acuerdo con las propiedades del combustible convencional, en este caso el ACPM. Atendiendo a los resultados y a la observación del ensayo, la rata de avance de la inyección no es suficiente para las mezclas, estas exigen una variación más rápida del avance de la inyección para mantener óptimo el proceso de combustión a mayores velocidades del motor, exigencias que obviamente no se satisfacen a cabalidad para cada mezcla.

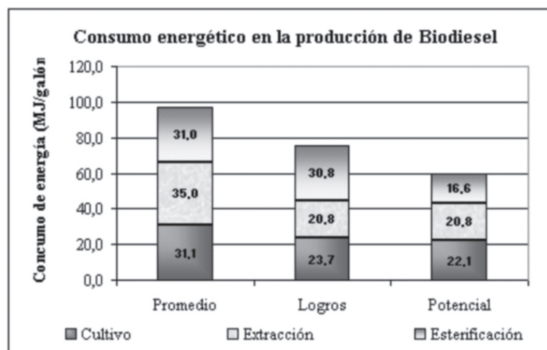


Fig. 2. Requerimiento energético producción de Biodiesel Fuente. Institute for Local Self-Reliance [2].

Balance energético del Biodiesel

Ante la variedad de factores que gobiernan los precios, ajenos al proceso tecnológico, para el análisis de costos de producción resulta de mayor objetividad el análisis energético del proceso, examinando paso a paso la energía invertida en producir determinada cantidad de combustible, comparada contra la energía útil finalmente obtenida del mismo. Indicadores como éste, brindan una mejor información acerca de la eficiencia del proceso de producción de biodiesel, lo que constituye paso fundamental para la determinación y análisis de sus costos. El aporte energético se puede discriminar así:

- Cultivo: Aporte energético representado en semillas, abonos, insecticidas, combustible para mecanizado, cosecha y transporte.
- Extracción y refinación: Aporte energético representado en solventes, vapor, energía eléctrica
- Esterificación: Aporte energético representado en alcohol, catalizadores, vapor, energía eléctrica, agua, transporte.

En el caso del proceso de obtención de biodiesel a partir de soya, según estudio realizado por the Institute of Local Self Reliance [2], en promedio se requieren 97 MJ para producir un galón de biodiesel, del cual según su poder calorífico se pueden extraer aproximadamente 130 MJ. Tales cifras muestran un requerimiento de aproximadamente 3 unidades de energía por cada 4 finalmente aprovechables, eficiencia sumamente baja con relación a los índices de eficiencia de los procesos de producción de combustibles fósiles, cercanos a 0.2 MJ invertidos por cada MJ de combustible obtenido (figura 2)

Lo anterior ha obligado a la revisión de cada aporte energético con el objeto de optimizar el proceso y lograr un mejor balance energético. En efecto en la figura 2 se presentan logros alcanzados incidiendo sobre el cultivo, la extracción y refinación del aceite. No obstante la esterificación plantea retos importantes para su indispensable optimización. Como se muestra en la figura 3, el proceso de transesterificación requiere además de reactivos y catalizadores de un aporte de energía. El valor del aporte energético usualmente en energía eléctrica y calor depende del origen del aceite y de la inversión energética para obtener productos químicos relevantes como el alcohol. En este sentido grandes diferencias muestra la figura 3 entre los procesos que se llevan a cabo en Estados Unidos y en Europa:

Para la colza de los europeos el contenido de aceite es mayor que para la soja de los americanos, por lo que se requiere de menor aporte de electricidad y calor; sin embargo, el alcohol extraído de la remolacha tiene un mayor costo energético para el caso europeo que el alcohol extraído del maíz para el caso americano. Tanto para una variable como para la otra, el mejoramiento de estos procesos redundará en menores costos de obtención del biodiesel.

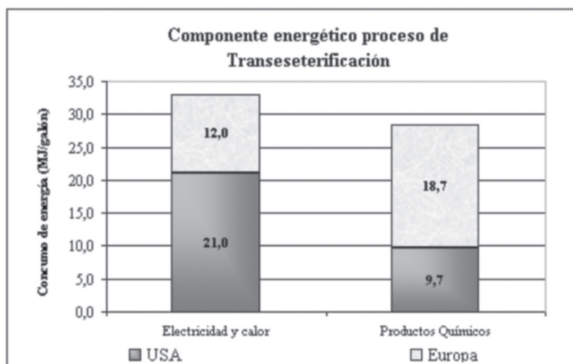


Fig. 3. Componente energético proceso transesterificación. Fuente. Institute for Local Self-Reliance [2].

Con relación a los costos de producción de aceite, materia prima para obtener el biodiesel, la figura 4 muestra como los países del tercer mundo Indonesia, Malasia y Colombia, se ven favorecidos por el mejor rendimiento de la palma africana, frente a la colza europea y a la soja de Estados Unidos. Atendiendo principalmente al costo de mano de obra y a los índices de tecnificación de los cultivos, el costo de producción del aceite de palma en Colombia es relativamente alto con relación al de los países asiáticos, cotizándose actualmente en valores aproximados a los 600 dólares por tonelada.

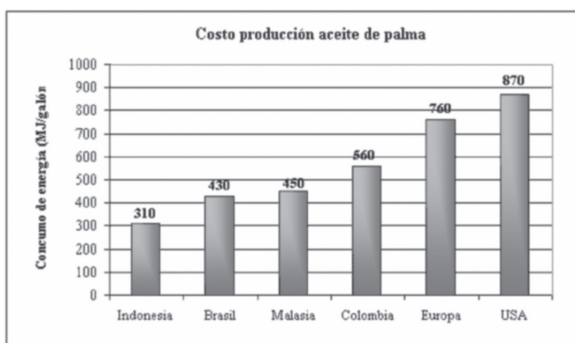


Fig. 4. Costo producción aceite de palma. Fuente. Fedepalma, estadísticas [17].

Las condiciones anteriores en cuanto a naturaleza, materias primas y reactivos del proceso de transesterificación, determinan costos de producción y finalmente precios del biodiesel en el mejor de los casos, por encima de los 2.6 dólares por galón, situación que de mantenerse generaría desestímulo en la producción y utilización del biodiesel.

De acuerdo con estadísticas publicadas por fedepalma [17], se cuenta con una base de gran consistencia como lo es un sector palmero de 240.000 hectáreas, con el mejor de los rendimientos, 4.5 toneladas de aceite por cada hectárea, las cuales producen 630 mil toneladas de aceite al año, 250 mil se exportan mientras que las 380 mil restantes configuran consumo doméstico.

El consumo nacional diario de ACPM asciende a los 60 mil barriles, por lo que si se pretendiera al igual que con la gasolina reemplazar inicialmente un 10% por biodiesel, esto demandaría 6 mil barriles diarios, equivalentes a 300 mil toneladas anuales, lo que exigiría el incremento del área sembrada aproximadamente en un 50%, lo cual traería consigo mayores consecuencias que las generadas por la contaminación atmosférica, sumado a esto el proceso de transesterificación aplicado a nivel industrial necesario para suplir esta cantidad de biocombustible conlleva a que sus subproductos como la glicerina se configuren como lastre y motivo de ineficiencia del proceso, dada su imposibilidad de comercialización. En efecto, la cantidad de energía acumulada en la glicerina producida se equipara con la energía invertida en la producción del biodiesel.

CONCLUSIONES

La verificación experimental de elementos teóricos acumulados e hipótesis propuestas y la experiencia práctica misma, acumulada durante la realización del presente trabajo, permiten concluir positivamente la posibilidad de utilización de aceites vegetales, como también de Biodiesel.

Las dificultades presentadas en el ensayo y específicamente en el desempeño del motor, coinciden con lo encontrado en estudios anteriores, en el sentido de que la respuesta del motor de inyección directa empeora cuando se trabaja con aceites no modificados. A pesar de las limitantes relacionadas con el tipo de motor, las modificaciones ligeras llevadas a cabo, han permitido acercar las propiedades físicas del aceite de palma, a las condiciones del sistema de alimentación. No ocurre lo mismo con el efecto tanto físico como químico del alcohol utilizado, para el cual el mejoramiento del factor viscosidad del aceite, no compensa su pérdida de inflamabilidad, causando además vaporización y disociación de la mezcla en el sistema de alimentación. Al contrario de los motores a gasolina, en los Diesel seguirá siendo recomendable solo porcentajes menores al 1%, para mejorar las propiedades anticongelantes allí donde las condiciones climáticas lo exijan.

Los incrementos en los niveles de producción de aceites vegetales como el Aceite de Palma, constituyen especial interés a incursionar en su uso o el de sus derivados, ofreciendo el biodiesel mayor atractivo sobre los aceites vegetales crudos, gracias a su fácil adaptación a las tecnologías actuales, puesto que la utilización del Aceite de Palma crudo exige la adecuación de sistemas adicionales a los motores existentes.

De acuerdo con los resultados de estas pruebas, catalogadas como pruebas de corta duración, niveles de mezcla hasta

del 80% de aceite de palma, tienen un aceptable desempeño también en los motores Diesel mas difundidos, como son los de inyección directa; A pesar de esto, al considerar las dificultades prácticas para el precalentamiento del combustible, sumadas a las categóricas exigencias de mantenimiento dispendioso y frecuente, emanadas de la experiencia de pruebas de larga duración realizadas con aceites no modificados, se recomienda la utilización de porcentajes de aceite inferiores al 50%; niveles superiores solo en casos extremos y temporalmente.

La utilización de niveles de mezcla superiores al 30%, exigen como única pero indispensable condición la modificación del sistema de alimentación consistente en:

- Presurización del sistema de transferencia y suministro de combustible.
- Implementación de un sistema de precalentamiento del combustible para mantener temperaturas de entrada cercanas a los 50 °C. Es técnicamente viable la utilización de gases de combustión, en intercambiadores de calor que comprometan no más del 10% en pérdidas de presión.

Un mayor grado en la optimización de condiciones para el mejor desempeño del motor, amerita un estudio tendiente al rediseño del sistema de regulación del avance la inyección en función de la frecuencia de rotación, acorde a las propiedades del aceite de palma. De un trabajo semejante se tiene certeza que producirá resultados de interés para el optimizar el desempeño de mezclas de biocombustibles.

Los resultados arrojaron una disminución en las emisiones de material particulado al emplear mezclas con Biodiesel, sin embargo se hace imperativo realizar un estudio tendiente a caracterizar la composición química (metales pesados, carbono orgánico, carbono elemental) de las emisiones del motor Diesel al operar con mezclas de Diesel – Biodiesel.

Si bien el Biodiesel representa una excelente alternativa, desde el punto de vista tecnológico y ambiental, en la actualidad no existe una planta adecuada de tal manera que permita la producción de Biodiesel a gran escala, lo que conlleva a costos extremadamente altos en comparación con los combustibles fósiles, dificultando su fácil adaptación al mercado, relegando su función a una de carácter netamente experimental. De otra parte, es necesario indagar a fondo las desventajas que presenta el Biodiesel, en cuanto al envejecimiento y la baja calidad de la materia prima y del proceso de obtención, puesto que, investigaciones previas han logrado determinar que estos factores promueven la formación de ácido acético y fórmico, que atacan los componentes del sistema de inyección, por esta razón y por cuestiones de garantía, los fabricantes de automóviles tanto Europeos como americanos solo recomiendan el 5% de contenido de Biodiesel en las Mezclas.

REFERENCIAS

- [1] Gumpon Prateepchaikui and Teerawat Apichato. Palm Oil as a Fuel for Agricultural Diesel Engines: Comparative Testing against Diesel Oil. Songkla University, Hat Yai, Songkla 90112, Thailand. SONGKLANAKARIN Journal of sci-ence and technology Vol. 25 No. 3 May-June 2003.
- [2] How Much Energy Does It Take to Make a Gallon of Soydiesel?, Institute for Local Self-Reliance
- [3] Jovac y otros. Motores de Automóvil. Editorial Mir. 1980.
- [4] Kann Juri, Rang Heino, and Kriis Juri. Advances in biodiesel fuel research. Institute of Chemistry, Tallinn Technical University, Akademia tee 15,12618 Tallinn, Estonia march 2002.
- [5] Kuehl Robert. Diseño de Experimentos: Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación. Internacional Thomson Editores. Segunda Edición. México 2001.
- [6] Lue Yeou-Feng, Yeh YiYen, and Chung-Hsing Wu. The Emission Characteristics Of a Small D.I. Diesel Engine Using Biodiesel Blendad Fuels. www.dekker.com. 2001
- [7] N. Milovanovic and R. Chen, R. Dowden y J. Turner. An investigation of using various diesel-type fuels in homogeneous charge compression ignition engines and their effects on operational and controlling issues. 2004.
- [8] Peterson Charles L. and L. Auid Dick. Department of agricultural engineering University of Idaho Moscow, Idaho. Technical Overview of vegetable oil as a transportation Fuel. ASME 1991.
- [9] Rodríguez-Anton, L.M., el al. High pressure physical properties of fluids used in diesel injection systems. SAE Paper 2000-01-2046, 2000, pp.-10.
- [10] ROJAS, Néstor Y. Revisión de las Emisiones de material Particulado por la Combustión de Diesel y Biodiesel. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre de 2004.
- [11] Stratta José, Biocombustibles: Los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. Investigación y desarrollo – Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado. http://www.bcr.com.ar. Agosto 2000.
- [12] Serrano Rico, Influencia de la Condiciones de Carga de un Motor Diesel en la Generación y morfología de la Partículas de las Emisiones. Universidad de los Andes, Bogotá 2001.
- [13] Villareal Infante & Ecología y Entropía Ltda. Estudio Sobre la Prefactibilidad Técnica y Económica de la Producción en Colombia de Derivados del Aceite de Crudo de Palma como Carburantes para Motores de Ciclo Diesel. FEDEPALMA. Julio 2004.
- [14] Yamane K., Ueta A and Y. Shimamoto. Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine.
- [15] Zhou Pl., Fet AM, Michelsen O. and Fet. K A feasibility study of the use of biodiesel in recreational boats in the United Kingdom.
- [16] 2004 BIODISEL. Handling and use Guidelines U.S Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy.
- [17] Fedepalma, Estadísticas 2004, www.fedepalma.com